2. 作物生理與水分需求監測技術應用

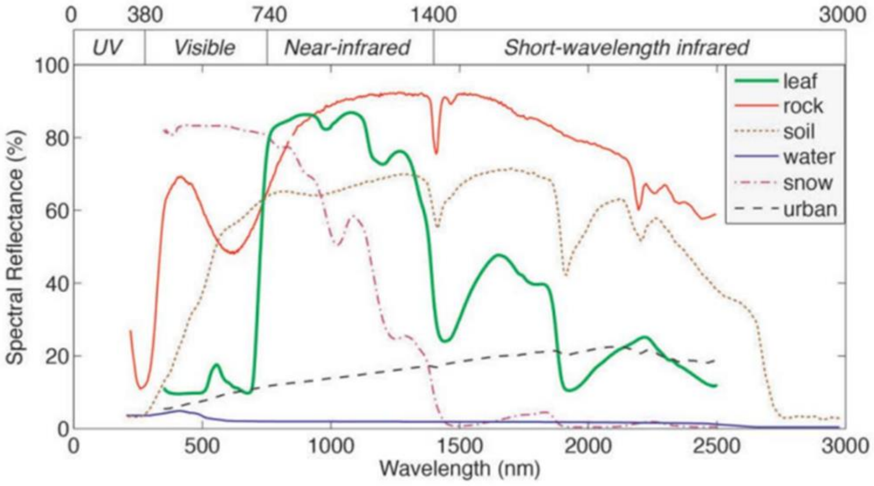
農業部農業試驗所/侯雅玲/助理研究員
國立臺灣大學農藝學系/林香君/助理教授

2.1 作物生理監測技術簡介

本節將從 3 個面向簡要概述作物生理監測技術，包含 (1) 缺水逆境下作物的生理反應；(2) 非破壞性的感測類別；(3) 多旋翼無人機載具平台的特點。

作物健康管理與監測攸關作物生長、產量與品質表現。當土壤中水分不足以供應生理發育所需，作物遭遇乾旱逆境時在生理生化及形態層次都會發生改變，在生理層次上，離層酸 (Abscisic acid, ABA) 及抗氧化酵素濃度上升、氣孔關閉，降低葉片膨脹速率、葉片含水量、氣孔導度與蒸散速率，使葉片溫度升高，並影響葉綠素含量與穩定性，導致水分吸收與同化效率下降。這些生理反應是作物對缺水環境快速且敏感的調節機制。在形態層面，水分不足會使葉片捲曲、葉面積、葉片壽命與乾重明顯下降，同時株高與根系發育也受抑制、提早衰老，整體生長潛力受限。

透過監測作物的生理反應與逆境訊號，我們能掌握其確切的用水需求，做出更合理的灌溉決策。偵測乾旱反應的表現特徵方法，可依據感測器的類型分為 3 類，包含 (1) 熱紅外線感測 (Thermal sensing)，透過監測冠層溫度與蒸散作用間的關聯來反映水分狀態；(2) 光譜感測 (Spectral sensing)，因為葉片反射光譜特徵直接受其葉綠素、葉黃素、水分含量、內部結構等影響，藉由反射光譜特徵差異可以反映葉片含水量與光合活性等狀態之變化。0.4-2.5 μm 之反射光譜訊號 (圖一) 可透過可見光、多光譜 (Multispectral) 或高光譜 (Hyperspectral) 相機偵測，常見的植生指數 (Vegetation Indices, VIs) 多基於不同波段的反射率組合而得；(3) 太陽誘導葉綠素螢光 (sun-induced fluorescence, SIF)，直接指標化光合作用效率與能量利用狀態，但受限於設備昂貴與資料處理挑戰。這些方法隨著不同研究對象、目標、環境條件，適用性也不同。反射光譜感測器可跨多種平台尺度，捕捉不同波段資訊，分析面向廣泛，且適合數位化處理分析，應用上最為普及。



圖一、不同物質表面的反射光譜 (Gaju *et al.*, 2023)。

感測器需結合觀測載具與技術平台來蒐集外表型數據資料，平台包括手持式感測、地面 (Ground-based)、溫室環控平台 (Indoor/controlled)、空中平台 (Aerial)、衛星平台 (Satellite)，不同層級之平台皆有其定位與限制。多旋翼無人機 (multi-rotor UAV) 兼具直升機的懸停、低空飛行特點，以及低成本、操作簡易、機動性高不受雲層限制，以及高時空解析度的優勢。相較於地面平台之限制，可在單次飛行中取得大面積田區的同步數據，避免拍攝時間不同所造成的誤差，提升效率與一致性 (Gago *et al.*, 2015, Ihuoma & Madramootoo, 2017)。

2.2 植生指數於作物水分需求監測之應用

近年來，臺灣的氣候變化越來越明顯，乾旱持續的日數增加，雨季的來臨時間也有所改變。對農民來說，最大的挑戰就是如何在有限的水資源下，依然維持作物的健康與產量。傳統上，農民常依靠經驗來判斷作物是否缺水，例如觀察葉片顏色、觸摸土壤濕度，或等到作物明顯乾枯才採取行動，但往往為時已晚。

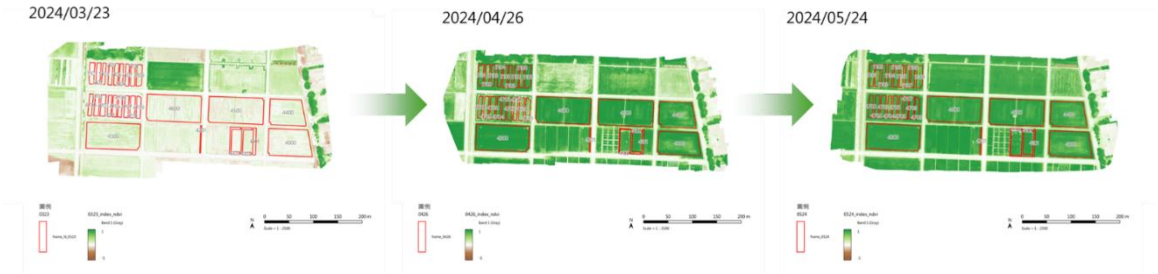
在這項研究中，我們利用搭載多光譜相機的多旋翼無人機，從空中監測作物的生長狀態。我們提出的問題很簡單：能不能透過影像快速判斷作物是否缺水？如果可以，農民就能依照科學數據來決定澆水，而不必憑經驗猜測，既能節省水資源，也能確保收成。

所謂「植生指數」，就是透過葉片的反射光來了解植物的健康狀況。最常用的一種是 NDVI (歸一化植生指數)，它利用植物在紅光與近紅外光波段的反射差異來判斷綠色程度。簡單來說，

葉片越翠綠，NDVI 值就越高；反之，如果葉片乾枯或缺水，NDVI 值就會下降。這些數字好比植物的「體檢報告」。過去要取得這些數據，需要用儀器逐株測量，非常耗時費力。現在透過無人機，只需短短幾分鐘，就能一次掃描整片田區，蒐集成千上萬株植物的健康資訊，效率遠勝傳統方法。

我們將這項技術應用到水稻田的實驗中 (圖二)，結果顯示節水栽培的水稻依然能長得很好。在兩期作的試驗裡，我們設置了 3 種灌溉方式：傳統的「田裡一直有水」、飽水供應，以及「間歇性乾濕」(AWD)。許多人擔心少澆水會影響水稻生長，但無人機拍攝的 NDVI 曲線顯示，節水處理的水稻與慣行栽培一樣綠意盎然。為了驗證結果，我們也測量了氣體交換速率、蒸散速率與葉綠素含量，3 種灌溉方式間幾乎沒有差異。

這表示無人機 NDVI 的結果和傳統生理調查高度一致，證明水稻其實相當能適應節水管理。農民不必擔心「不泡田」會減產，反而能在不影響收成的情況下節省大量水資源。對臺灣這樣的水稻主要產區而言，這是一項兼顧糧食安全與水資源管理的雙贏策略。



圖二、無人機影像分析作物生長變化於 113 (2024) 年 3 月 23 日，4 月 26 日及 5 月 24 日。

玉米的反應則較為敏感，尤其在幼苗期。我們發現，如果在玉米初期就遇到缺水，植株光合作用會下降，NDVI 值也明顯降低，之後的生長勢較弱。但當玉米進入中後期後，缺水的影響就不再那麼嚴重。換句話說，玉米小時候需要好好照顧，長大後就比較耐旱。這樣的結果對農民非常有幫助：只要在玉米初期確保水分充足，後期就可以採取較節省的灌溉方式，而不會大幅影響產量。透過無人機對 NDVI 的早期監測，農民能及時掌握缺水狀況，並快速調整澆水策略。

在香蕉的試驗中，我們依照不同需水量比例進行灌溉，觀察 NDVI 的變化。結果發現，在幼苗期，NDVI 與澆水量之間沒有明顯關聯，可能受到降雨影響，或因幼苗本身對水分需求較低。這提醒我們，香蕉的缺水診斷最好在植株長大後進行，並且需要搭配土壤水分的監測。未來若能結合無人機的熱成像與地面感測器，將能更精準掌握香蕉的需水狀況。

綜合這些發現，可以看出不同作物的特性。水稻在節水灌溉下依然保持健康，適合推廣節水管理；玉米在幼苗期需要充足水分，後期則相對耐旱，適合分階段灌溉；香蕉在幼苗期對水分反應不明顯，需要在較大植株階段並結合土壤監測來判斷。這些成果顯示，無人機搭配植生指標，確實能幫助農民快速掌握大面積農田的缺水狀況，並提供更精準的灌溉依據。如果未來能再結合人工智慧與自動化系統，農業甚至可能實現「作物自己告訴你什麼時候要水」的夢想。

植生指標監測技術就像是作物的健康手環，能隨時回報它們的狀態。透過這樣的轉變，農民不再需要等到作物出現乾枯症狀才補救，而是能提前預警、及時調整。是農業邁向智慧化與永續化的重要一步。當農民能依靠科學數據澆水，就能把有限的水資源用在最需要的地方，讓資源有效運用並維持作物健康生長。